

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA:**  
**INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**  
**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:**  
**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MICRORREDES ELÉCTRICAS**  
**ANTE PERTURBACIONES CON**  
**CONTROL CONVENCIONAL PRIMARIO**

**AUTOR:**  
**FRANCISCO XAVIER ANDRADE TELLO**

**TUTOR:**  
**RAMÓN ENRIQUE PÉREZ PINEDA**

**Quito, julio del 2019**

### **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo Francisco Xavier Andrade Tello con documento de identificación N° 0802984823, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico intitulado: “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MICRORREDES ELÉCTRICAS ANTE PERTURBACIONES CON CONTROL CONVENCIONAL PRIMARIO”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Electrónico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de la Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



---

Francisco Xavier Andrade Tello  
C.I. 080298482-3

Quito, julio de 2019.

### **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MICRORREDES ELÉCTRICAS ANTE PERTURBACIONES CON CONTROL CONVENCIONAL PRIMARIO”, realizado por Francisco Xavier Andrade Tello, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.



Ramón Enrique Pérez Pineda

C.I. 095994829-0

Quito, julio del 2019.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado, primero, a Dios que es Aquel que me provee de inteligencia, perseverancia, de humildad para poder realizar cada uno de los planes en mi vida.

A mis padres Sócrates y Zoraida quienes han dedicado su vida para poder regalarme la oportunidad de salir adelante y así continuar con mis metas académicas.

A mis hermanas quienes han sido entes que han entregado cada una su grano de arena para mi crecimiento personal.

Y, por último, a mis compañeros y profesores que gracias a su paciencia y enseñanzas me compartieron todos los conocimientos necesarios para mi vida profesional.

*Xavier*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis familiares y amigos que con sus buenos deseos han aportado para que culmine los estudios en Ingeniería Electrónica en la Universidad Politécnica Salesiana, ya que con sus consejos y experiencias han marcado mi carrera universitaria, dejando a su paso conocimientos para su aplicación en el ejercicio profesional con disciplina y responsabilidad.

Agradezco al Doctor Ramón Enrique Pérez Pineda, PhD quien con su conocimiento ha guiado este Artículo Académico hasta su culminación.

A mis padres que han sido un pilar fundamental para llegar a concretar mis objetivos.

***Xavier***

# Análisis del comportamiento de microrredes eléctricas ante perturbaciones con control convencional primario.

Andrade Tello Francisco Xavier<sup>1</sup>  
fandradet@est.ups.edu.ec  
Ingeniería Electrónica  
Universidad Politécnica Salesiana  
Quito, Ecuador

Pérez Pineda Ramón Enrique<sup>2</sup>  
Docente Universidad Politécnica Salesiana  
Quito, Ecuador  
rperezp@ups.edu.ec

## Resumen

Una microrred eléctrica es una pequeña central de generación de energía compuesta por fuentes conectadas en paralelo para abastecer de energía eléctrica a las cargas también llamadas consumidores finales, siendo estas renovables como aerogeneradores, paneles fotovoltaicos, entre otros y generación no renovable como las máquinas a diésel. En el siguiente documento se analiza el comportamiento del sistema ante perturbaciones las cuales afectan directamente a las variables primarias como la tensión y la frecuencia, con el fin de obtener el control más eficiente. Un controlador Proporcional-Integral es implementado para observar su respuesta en estado estable y transitorio, un sistema de excitación para mantener los valores de tensión en los terminales y un método de ángulo de inclinación para estabilizar la frecuencia, para analizar su respuesta. Primero se muestran los resultados de una microrred sin control, segundo con control y ganancia  $K$  de referencia, tercero con control propuesto y  $K$  modificada y cuarto con perturbaciones provocadas intencionalmente como, el aumento y disminución de la carga, desconexión de las líneas del tendido eléctrico y la variación de la velocidad de viento que entra en las aspas del aerogenerador. Los resultados de este

comportamiento muestran un cambio satisfactorio. Al modificar la ganancia  $K$  del controlador se puede reducir los tiempos de subida y de estabilización los cuales para las variables de tensión y frecuencia son los más importantes.

**Palabras claves:** control convencional, microrred eléctrica, perturbación eléctrica.

## Abstract

Electric Microgrid is a small power generation plant composed of sources connected in parallel to supply electrical power in the loads can also be used as wind turbines, photovoltaic panels, among others as diesel machines, in the following document analyzes the behavior of the system with disturbances, which are directly the primary variables such as voltage and frequency, in order to obtain the most efficient control a proportional-integral controller is implemented to observe its response in steady state and transient, excitation system to maintain the voltage values in the terminals and the angle of inclination method to stabilize the frequency, to analyze the results of a non-controlled micro-network, second with control and reference gain  $K$ , third with proposed control and modified  $K$  and fourth with intentionally caused disturbances such as the increase and decrease of the load, disconnection of

power lines and variation of the wind speed that enters the blades of the wind turbine. The results of this behavior show a satisfactory change, by modifying the K gain of the controller it is possible to reduce the rise and stabilization times which for the voltage and frequency variables are the most important.

**Keywords:** conventional control, electric microgrid, electrical disturbance.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha buscado producir energía eléctrica sustentable y a bajo costo, para disminuir la dependencia de los combustibles de origen fósil, entre ellos el carbón y el petróleo [1], la cual es producida a través de centrales eléctricas que suelen interconectarse y suplir a los usuarios finales; sin embargo, por las distancias de las líneas que la transporta, se producen pérdidas y desmejora en los perfiles de tensión de la red [2]. En la actualidad se ha visto la necesidad de crear sistemas que aporten energía sostenible, que mantenga un ciclo equilibrado, entre la producción y el consumo lo cual es una característica principal de las microrredes eléctricas que acercan la generación y el usuario final disminuyendo las pérdidas por el transporte de energía y aumentando la eficiencia [3][4]; también puede abastecer la demanda eléctrica que se presente y mejorar el servicio eléctrico, tanto en zonas rurales como urbanas. Poseen fuentes de generación renovable, como paneles solares y turbinas eólicas, y otras que no son renovables, como la máquina a diesel, se pueden encontrar en operación de manera conectada a la red, o de manera independiente, es decir aislada de la red [5], manteniendo las mismas características en los dos casos. La aislada es un sistema no conectado a la red, y de pequeñas dimensiones siendo

estas una de las grandes ventajas que ofrece su implementación [6].

En esta investigación se considera una microrred eléctrica aislada debido a las nuevas tecnologías que existen en la actualidad, incluyendo fuentes de generación renovable eólica y solar, una fuente de generación diesel y cargas. Los inconvenientes que se presentan en microrredes eléctricas son variaciones de tensión y frecuencia, cuando son sometidas a perturbaciones internas y externas [7]. Sebastián [8] mostró un sistema diesel con máquina sincrónica y otro eólico con máquina asincrónica en conjunto sin panel solar fotovoltaico y sin pila de celda de combustible. Este sistema es utilizado a menudo en las microrredes según el autor en el cual corroboró que debido a su dinámica resultó útil y sencillo, debido a que el control está basado en tres funcionamientos, sólo máquina a diesel, sólo turbina eólica y máquina a diesel en conjunto con la turbina eólica. Esta dinámica se debe a los diferentes comportamientos de la carga que el autor coloca como referencia, posteriormente Sebastián y Peña [9] muestran un esquema similar, con un sistema de excitación y un gobernador a diesel para la máquina sincrónica. La velocidad del viento para este estudio fue constante por lo que no implementaron un sistema de control de inclinación para la frecuencia en la generación eólica. Un estudio realizado por Krishan [10] muestra una estrategia de control de ángulo de inclinación para regular la frecuencia del sistema eólico con máquina a diésel. El sistema fue sometido a variaciones en la velocidad del viento. Los resultados de esta propuesta demostraron, según el autor, que las desviaciones de frecuencia disminuyeron.

Si se analiza cada estudio, se puede observar que los escenarios como el

control para las variaciones del viento y un gobernador a diesel se utilizaron separadamente, también la utilización de un panel fotovoltaico y el almacenamiento de energía por medio de pila de celdas de combustible, no fueron implementados ya que estos no poseen un control en específico debido a que su aportación de potencia es muy baja en comparación a las máquinas rotatorias; por tal razón, en esta investigación se incluyen todos los controles y todas las fuentes generadoras. Al momento de implementar el control convencional primario se espera mantener estables las variables primarias como la tensión y la frecuencia en sus valores de referencia ante cualquier perturbación, cambiando los valores de los parámetros. Esto se llevará a cabo mediante una simulación.

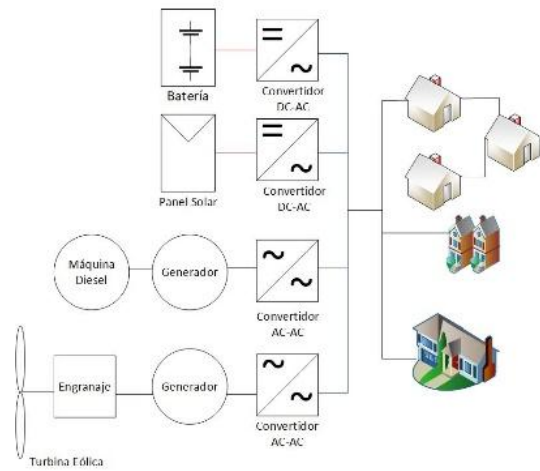
El resto de la investigación se organiza en la sección 2 con las bases teóricas de la microrred eléctrica con sus componentes, la descripción del control convencional primario y las perturbaciones eléctricas; en la sección 3 la metodología utilizada para la simulación de la microrred; en la sección 4 los resultados y discusión y, finalmente, en la sección 5 las conclusiones del trabajo.

## 2. BASES TEÓRICAS

### 2.1 Microrred Eléctrica

Una microrred eléctrica se considera una versión a pequeña escala de las grandes centrales de generación eléctrica, que son utilizadas en la actualidad [11]. Es un grupo de cargas interconectadas entre sí y totalmente distribuidas [12], abastecidas por fuentes de energías que trabajan a baja y media tensión; sirven para distribuir y regular el flujo de electricidad a consumidores [13], compuesta por recursos energéticos distribuidos como se indica en la figura 1, paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas

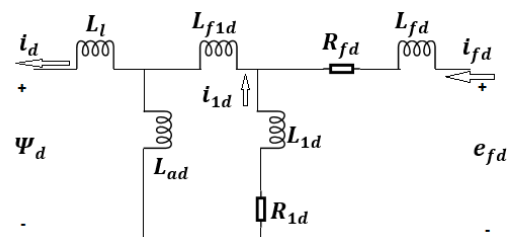
y generadores eléctricos, así como el almacenamiento de energía con baterías recargables y cargas.



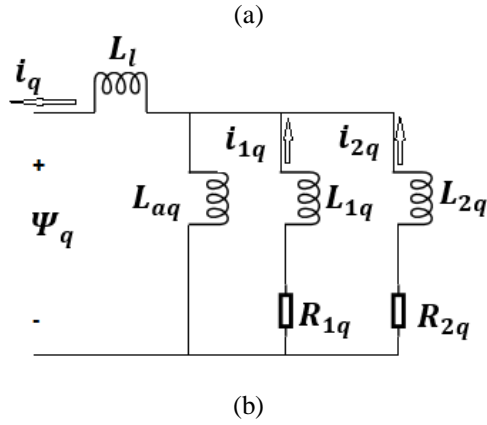
**Figura 1.** Microrred eléctrica aislada. [14] Elaborado por: Francisco Andrade

### 2.2 Máquina Sincrónica

La máquina síncrona es una máquina de corriente alterna cuyos polos del rotor son excitados por una corriente continua, generando un flujo sinusoidal distribuido en el entrehierro, su giro establece un campo magnético rotatorio que induce una tensión en sus devanados del estator, como parte del sistema eléctrico, estos devanados se conectan a la red eléctrica y el rotor es impulsado por un motor externo [15]. Al utilizar esta máquina como generador acoplado a un sistema eléctrico, los devanados del estator están conectados a la red de corriente alterna, y su rotor está anclado al motor a diésel. Para estudios dinámicos de la máquina síncrona su circuito equivalente se modela por medio de los ejes directo (d) y de cuadratura (q) tal como se muestra en la figura 2:







**Figura 2.** Circuito equivalente de la máquina Sincrónica (a) Eje-D, (b) Eje-Q. [16] Elaborado por: Francisco Andrade

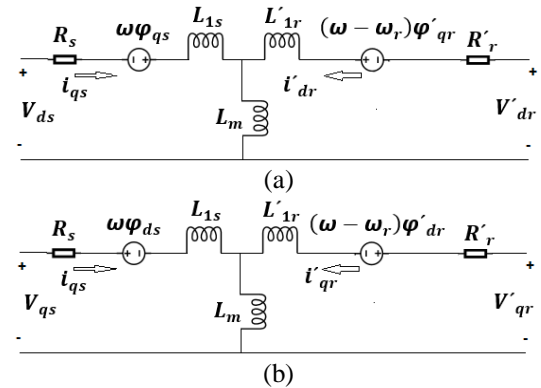
Donde,

- $\Psi_d$  = Enlace de flujo del estator eje directo.
- $\Psi_q$  = Enlace de flujo del estator eje de cuadratura.
- $i_d$  = Corriente del estator en el punto de operación eje directo.
- $i_{1d}$  = Corriente 1 del estator en el punto de operación eje directo.
- $i_q$  = Corriente del estator en el punto de operación eje de cuadratura.
- $i_{1q}$  = Corriente 1 del estator en el punto de operación eje de cuadratura.
- $i_{2q}$  = Corriente 2 del estator en el punto de operación eje de cuadratura.
- $L_l$  = Inductancia de fuga del estator.
- $L_{ad}$  = Inductancia magnetizante eje directo.
- $L_{aq}$  = Inductancia magnetizante eje de cuadratura.
- $L_{f1d}$  = Inductancia 1 del devanado de campo eje directo.
- $L_{1d}$  = Amortiguador Inductancia del devanado eje directo.
- $R_{1d}$  = Amortiguador Resistencia del devanado eje directo.
- $L_{1q}$  = Inductancia 1 del devanado eje de cuadratura amortiguador.
- $R_{1q}$  = Resistencia 1 del devanado eje de cuadratura amortiguador.
- $L_{2q}$  = Inductancia 2 del devanado eje de cuadratura amortiguador.
- $R_{2q}$  = Resistencia 2 del devanado eje de cuadratura amortiguador.
- $L_{fd}$  = Inductancia del devanado de campo.
- $R_{fd}$  = Resistencia del devanado de campo.
- $i_{fd}$  = Corriente del devanado de campo.
- $e_{fd}$  = Tensión del devanado de campo.

### 2.3 Máquina Asíncrona

La máquina asíncrona o de inducción tiene un devanado en el estator que se excita desde una fuente externa de

corriente alterna, su rotor está formado por una estructura laminada con ranuras oblicuas en las que se ha fundido un material conductor, lo que produce un rotor sólido, cilíndrico, en cortocircuito, llamado comúnmente jaula de ardilla; también el rotor puede tener un devanado que debe estar aislado de las ranuras y conectado a anillos rozantes. Los terminales del devanado del rotor se pueden conectar a circuitos externos o pueden estar cortocircuitados. Este último se conoce como rotor devanado. Un generador tipo jaula de ardilla, requiere que su velocidad de rotación sea mayor que la velocidad de sincronismo, porque si es menor estará actuando como motor; así lo afirma Toro [17]. Para estudios dinámicos de la máquina asíncrona su circuito equivalente se modela por medio de los ejes directo (d) y de cuadratura (q) tal como se muestra en la figura 3:



**Figura 3.** Circuito equivalente de la máquina asíncrona (a) Eje-D, (b) Eje-Q. [16] Elaborado por: Francisco Andrade

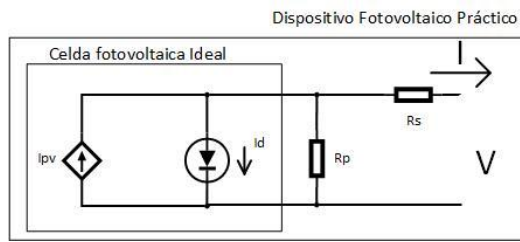
Donde,

- $V_{qs}$  = Tensión estator eje de cuadratura.
- $V_{ds}$  = Tensión estator eje directo.
- $R_s$  = Resistencia de estator.
- $i_{qs}$  = Corriente estator eje de cuadratura.
- $\omega$  = Velocidad angular del rotor.
- $\omega_r$  = Velocidad angular eléctrica.
- $\phi_{ds}$  = Flujo del eje directo del estator.
- $\phi_{qs}$  = Flujo del eje de cuadratura del estator.
- $L_{1s}$  = Inductancia total del inductor.
- $L_m$  = Inductancia de magnetización.
- $L'_{1r}$  = Inductancia total del rotor.
- $\phi'_{dr}$  = Flujo del eje directo del rotor.
- $\phi'_{qr}$  = Flujo del eje de cuadratura del rotor.
- $i'_{qr}$  = Tensión del rotor eje de cuadratura.

$i'_{dr}$  = Tensión del rotor eje directo.  
 $R'_r$  = Resistencia del rotor.  
 $V'_{qr}$  = Tensión del rotor eje de cuadratura.  
 $V'_{dr}$  = Tensión del rotor eje directo.

## 2.4 Panel Solar Fotovoltaico

Son paneles de celdas fotovoltaicas de silicio que absorben fotones provenientes de los rayos solares para generar electricidad continua, son utilizados en grandes paneles unidos en series, para transformar la energía solar en energía eléctrica continua, con parámetros propios de irradiación y temperatura. Las celdas solares se pueden clasificar como celdas de primera, segunda y tercera generación. Las celdas de primera generación están hechas de policristalino y silicio monocristalino. Estas celdas monocristalinas son mejores que otros en términos de eficiencia [18]. La figura 4 muestra el circuito equivalente de la celda fotovoltaica (PV, por sus siglas en inglés) con  $R_s$  como la resistencia en serie equivalente y  $R_p$  es la resistencia paralela equivalente de la matriz PV. La ecuación fundamental que determina las características corriente-tensión de una celda fotovoltaica ideal se formula en (1):



**Figura 4.** Circuito Equivalente de una celda solar del Panel Fotovoltaico. [19] Elaborado por: Francisco Andrade

$$I_d = I_{pv,cell} - I_{o,cell} \left[ \exp\left(\frac{qV}{aKT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

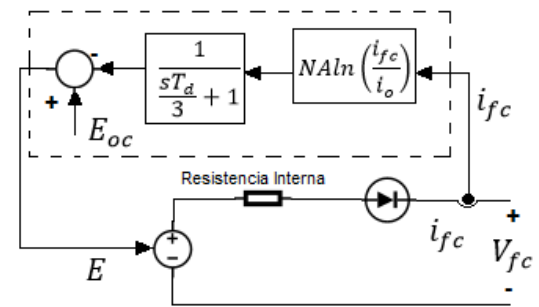
Donde,

$I_{pv,cell}$  = Corriente producida por la luz incidente (directamente proporcional a la radiación solar).

$I_d$  = Ecuación del diodo de Shockley.  
 $I_{o,cell}$  = Saturación inversa o corriente de fuga del diodo.  
 $q$  = Carga de electrones ( $1.60217646 \times 10^{-19}$  C).  
 $K$  = Constante de Boltzmann ( $1.3806503 \times 10^{-23}$  J / K).  
 $T$  = Temperatura de la unión p – n.  
 $a$  = Constante idealista del diodo (0.87223).

## 2.5 Pila de celdas de combustible

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de una reacción electrolítica directamente en energía eléctrica, rechazando solamente calor y agua. A pesar de ser una fuente limpia de energía sólo son capaces de producir tensión no regulada de corriente continua, de ahí la necesidad de convertidores de potencia para interconectar la carga accionada, se necesita un modelo exacto de celdas de combustible para observar sus actuaciones de estado dinámico y constante necesario para el diseño, control y simulación de tales convertidores [20]. El modelo simplificado representa una pila de celdas de combustible por una fuente de tensión controlada en serie con una resistencia constante como se muestra en la figura 5.



**Figura 5.** Modelo simplificado de una célula de batería stack. [20] Elaborado por: Francisco Andrade

La fuente de tensión controlada  $E$  se describe por la ecuación (2) y la tensión de la celda por la ecuación (3):

$$E = E_{oc} - NA \ln\left(\frac{i_{fc}}{i_o}\right) \cdot \frac{1}{\frac{sT_d}{3} + 1} \quad (2)$$

$$V_{fc} = E - R_{ohm} \cdot i_{fc} \quad (3)$$

Donde,

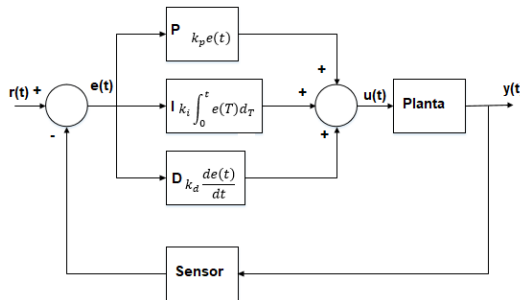
$E_{oc}$  = tensión de circuito abierto (V)  
 $N$  = número de celdas  
 $A$  = pendiente Tafel (V)  
 $i_o$  = corriente de intercambio (A)  
 $T_d$  = tiempo de respuesta (al 95% del valor final) (seg)  
 $R_{ohm}$  = resistencia interna ( $\Omega$ )  
 $i_{fc}$  = corriente de la celda de combustible (A)  
 $V_{fc}$  = tensión de la celda de combustible (V)

## 2.6 Control convencional primario

El control convencional primario, también conocido como control local o control interno se basa, exclusivamente, en mediciones locales, como la tensión y la frecuencia y es el primer nivel en la jerarquía del control convencional, con la más rápida respuesta ante errores [21], responde a la dinámica del sistema y mantiene la tensión y la frecuencia estable dentro de la microrred aislada.

Un controlador convencional primario rápido es el controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID), utilizado mucho en corrección de errores. Chen, Omidvar, Azad y Yao [22] definen una señal de control  $u(t)$ , como se indica en la ecuación 4. El diagrama de bloque característico de un controlador PID viene dado por la figura 6.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(T) dT + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$



**Figura 6.** Diagrama de bloques de un controlador PID en un bucle de realimentación. [22] Elaborado por: Francisco Andrade

El comportamiento dinámico de un sistema de control en lazo cerrado, generalmente, se caracteriza por el sobreimpulso, tiempo de subida, tiempo

de establecimiento y error en estado estacionario cuya variación en función de las constantes de un controlador PID se muestran en la tabla 1:

**Tabla 1.** Relaciones entre parámetros PID y respuesta características. [22]

Parámetros	Tiempo de subida	Sobreimpulso
$K_p$	Disminuye	Aumenta
$K_i$	Disminuye	Aumenta
$K_d$	menor cambio	Disminuye

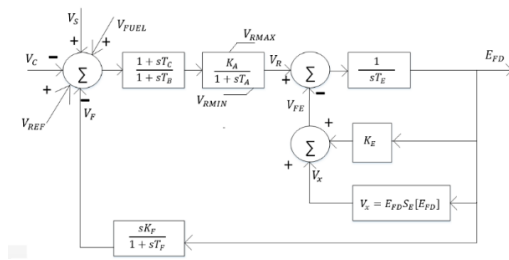
Parámetros	Tiempo de estabilización	Error en estado estacionario
$K_p$	pequeño cambio	Disminuye
$K_i$	Aumenta	Elimina
$K_d$	Disminuye	no afecta

Elaborada por: Francisco Andrade

Cabe recalcar que las variables de tensión y frecuencias son variables que sufren cambios rápidos en referencia al tiempo ante las perturbaciones [23], en comparación a las variables como la temperatura o la irradiación de un panel fotovoltaico, por ende se busca mantener un valor de referencia ante cualquier perturbación en un tiempo muy corto para evitar daños en los equipos, se implementa como controlador convencional primario Proporcional-Integral PI para reducir el tiempo de subida y eliminar el error de estado estacionario, dejando a un lado la parte derivativa [22]. Cuando se diseña un controlador PI, se espera que tenga una alta velocidad de respuesta como un tiempo de subida pequeño, y el error en estado estacionario sea cero, para así tener mayor robustez.

## 2.7 Sistema de Excitación de la máquina sincrónica

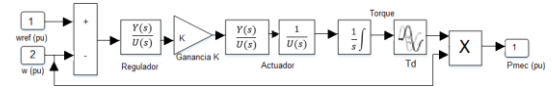
El sistema de excitación contribuye al control de la tensión y mejora la estabilidad del sistema, responde rápidamente ante una perturbación para mejorar la estabilidad transitoria y ajustar la tensión de campo del generador. Existen diversos tipos de sistemas de excitación entre ellos el sistema de excitación de corriente continua tipo DC1A como se indica en la figura 7, que será utilizado en esta investigación, este modelo se utiliza para representar los excitadores de conmutador de corriente continua y sus especificaciones se encuentran en el Comité de Desarrollo Energético y Generación de Energía de la Sociedad de Ingeniería de Energía [24][25].



**Figura 7.** Esquema de la excitatriz tipo DC1A. [24]  
Elaborada por: Francisco Andrade

## 2.8 Máquina Gobernador a Diesel

Una unidad de motor diesel y gobernador es un dispositivo que convierte la energía de combustible en energía mecánica en el motor diesel y, posteriormente, convierte la energía mecánica en energía eléctrica a través del gobernador que se puede definir como un dispositivo mecánico o electromecánico que controla automáticamente la velocidad de un motor en relación al consumo de combustible [26]. La figura 8 muestra en diagrama de bloques el esquema del gobernador a diésel y sus parámetros se definen en [15].

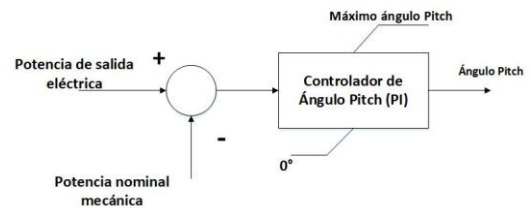


**Figura 8.** Esquema del gobernador a diésel  
Elaborado por: Francisco Andrade.

$\frac{Y(s)}{U(s)}$  = Función de transferencia del regulador  
 $\frac{1}{U(s)}$  = Función de transferencia del actuador  
K = ganancia Kp y Ki

## 2.9 Control de Ángulo de Inclinación

La estrategia de control de ángulo de inclinación es una técnica útil para proteger al sistema eléctrico eólico de la sobrecarga en el caso de una alta velocidad del viento y también para proporcionar la continuidad de la energía eléctrica generada al limitar la potencia mecánica a su valor nominal [27]. La figura 9 indica el sistema de control de ángulo de inclinación el cual se usa para optimizar la salida de la turbina cuando hay variaciones en la velocidad del viento. Este control incluye servomotores hidráulicos o eléctricos, los cuales sirven para posicionar las aspas en un ángulo adecuado dentro de un rango de 0 a 45 grados en condiciones normales para velocidades de rotación aproximadamente de 5 a 10 °/s [28].



**Figura 9.** Sistema de control de Ángulo Pitch. Elaborado por: Francisco Andrade

## 2.10 Perturbaciones Eléctricas

En los sistemas eléctricos, las perturbaciones se presentan como interferencias electromagnéticas o climáticas, internas y externas respectivamente, que pueden provocar

un mal funcionamiento de los equipos del sistema e incluso ocasionar daños irreversibles, las internas conocidas como eléctricas [29] y afectan básicamente a la tensión. Las internas son transitorios como variaciones rápidas de tensión que son producidas por conexiones y desconexiones de las cargas, las variaciones lentas de tensión que se presentan por la variación de las cargas con impedancias altas de cortocircuito, las sobretensiones que son muy cortas en el rango de los milisegundos y los huecos producidos por una caída repentina de tensión. Las fallas internas periódicas son los armónicos o fluctuaciones en forma de distorsión que se presentan en los picos de la tensión o corriente y Flicker es una variación de tensión rápida a frecuencias muy bajas [30][31].

Las perturbaciones externas vienen dadas por varios motivos; entre ellos están desconexiones de las fuentes generadoras, interrupción en las líneas de distribución eléctrica, incluso, las condiciones climáticas como poca velocidad del viento para mover las aspas del aerogenerador o la baja irradiación que llega a los paneles solares [32][33].

### 3. MARCO METODOLÓGICO

Una vez identificadas las variables de control que existen en una microrred eléctrica se procede a implementar la microrred junto al controlador convencional primario en un software computacional con las respectivas características. El sistema propuesto eólico, solar y diesel, consta de un generador sincrónico de 300 kVA junto con un motor diesel cuyos parámetros se indican en la tabla 2; un generador de inducción de 300 kVA cuyos parámetros se indican en la tabla 3, impulsado por una turbina eólica; un panel de 100 kW. Este tipo de panel se agrega a la

microrred como otra fuente de generación renovable. El tipo de panel que se adjunta es un SunPower SPR-30E-WHT-D con 66 cadenas paralelas y 5 módulos conectados en serie y una batería de almacenamiento de 50 kW Pila de Combustible de Membrana de Intercambio de Protones (PEMFC, por sus siglas en inglés) de 50kW y 625 Vdc. Estas fuentes generadoras están conectadas en paralelo para alimentar a la carga de 175 kW. Este esquema fue implementado en MatLab-Simulink tal como se muestra en la figura 10.

**Tabla 2.** Parámetros de la Máquina Sincrónica

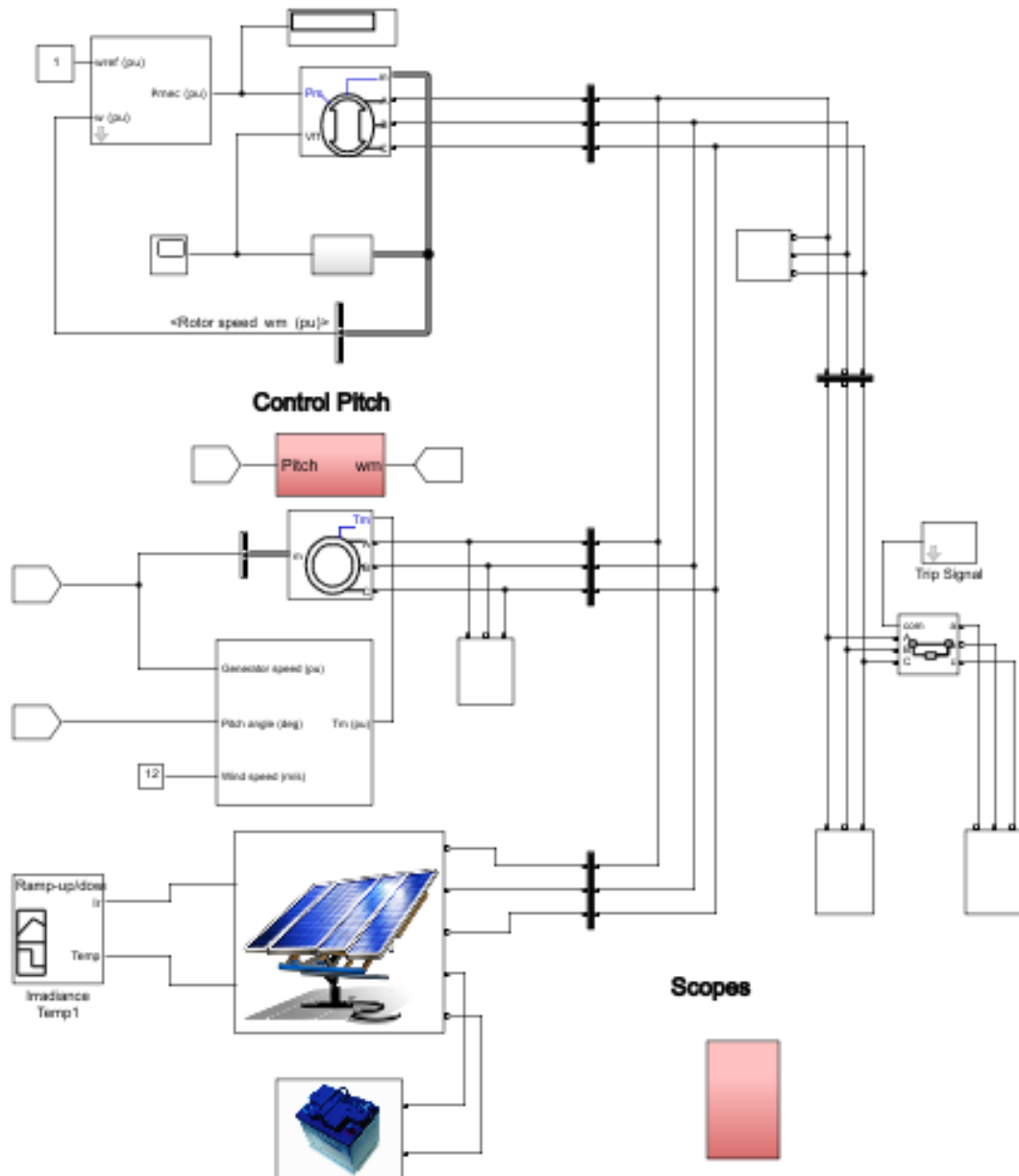
Escenario	Observaciones
Potencia total trifásica aparente $P_n$ (VA)	300 kVA
Tensión de línea RMS $V_n$ (V)	480 V
Frecuencia $f_n$ (Hz)	60 Hz
$X_d$ reactancia sincrónica del eje d	2.24 pu
$X_d'$ reactancia transitoria del eje d	0.17 pu
$X_d''$ reactancia subtransitoria del eje d	0.12 pu
$X_q$ reactancia sincrónica del eje q	1.02 pu
$X_q''$ reactancia subtransitoria del eje q	0.13 pu
$X_l$ reactancia de fuga	0.08 pu
$T_{do}'$ constante de tiempo transitoria circuito-abierto eje d	4.4849 s
$T_{do}''$ constante de tiempo subtransitoria circuito-abierto eje d	0.0681 s
$T_{qo}''$ constante de tiempo subtransitorio circuito-abierto eje q	0.1 s
$R_s$ resistencia estática	0.017 pu
$H$ coeficiente de inercia	1 pu
$F$ factor de fricción	0 pu
$p$ número de pares de polos	2
$\Delta\omega$ desviación inicial de la velocidad (% de la velocidad nominal)	0
$\theta_h$ ángulo eléctrico del rotor	-63.4208°
$V_f$ tensión de campo inicial (V).	183.748

Elaborada por: Francisco Andrade

**Tabla 3.** Parámetros de la Máquina Asíncrona

Escenario	Observaciones
Pn Potencia nominal	300 kVA
Vn Tensión nominal línea a línea	480 V
Fn Frecuencia nominal	60 Hz
Rs Resistencia estatórica	0.016 pu
Lls Inductancia de fugas	0.06 pu
Rr' resistencia del rotor	0.015 pu
Lls' inductancia de fuga	0.06 pu
Lm Inductancia de magnetización	3.5 pu
H constante de inercia	2 s
F factor de fricción	0 pu
P número de pares de polos	2

Elaborada por: Francisco Andrade



**Figura 10.** Esquema en Simulink de un sistema diesel, eólico y fotovoltaico. Elaborado por: Francisco Andrade

El sistema eólico tiene como entrada la velocidad del viento. En conjunto la máquina síncrona suministra potencia a la red y mantiene la frecuencia constante debido al gobernador diesel. La velocidad actual  $en$  por unidad (p.u) del gobernador diesel actúa como entrada y el par mecánico en  $p.u$  es la salida para regular la máquina síncrona en su valor de referencia que en este caso es 1 p.u; mientras que el regulador de velocidad se realiza con control PI. El esquema de control del ángulo de inclinación regula la potencia de salida

de la turbina eólica a su valor nominal mediante la colocación de las palas de la turbina eólica mediante el ajuste del ángulo inclinación en condiciones de viento fuerte. La entrada de la señal de error al controlador de ángulo de paso PI se deriva como la diferencia entre la velocidad del rotor del generador y el valor de referencia. La salida del controlador es el ángulo de inclinación de referencia. Las ganancias del controlador  $K_p$  y  $K_i$  están optimizadas para que el sistema de generación de energía eólica proporcione una salida de



energía adecuada. Los valores de  $K_p$  y  $K_i$  para una carga de 175 kW se obtuvieron por [10] como 154.7 y 1.7, respectivamente. Mediante el método heurístico de ensayo y error, se procede a probar las alternativas tomando como referencia el valor de la ganancia  $K$  propuesta por los autores antes mencionados e ir probando qué valor es el que menor error presenta. Se llevan a cabo los siguientes escenarios para validar el rendimiento de la técnica de control propuesta para la microrred eléctrica y sirven para validar el rendimiento del esquema de control propuesto, así como la mejora de la calidad de la potencia posterior a la perturbación. La descripción de los escenarios se presenta en la tabla 4:

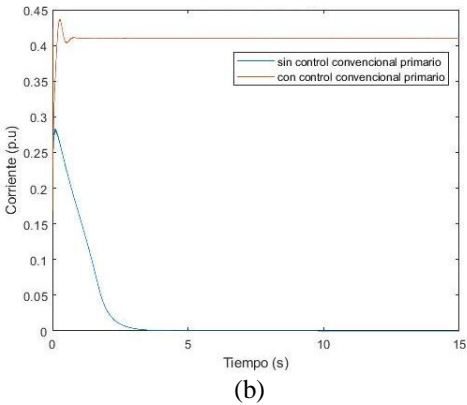
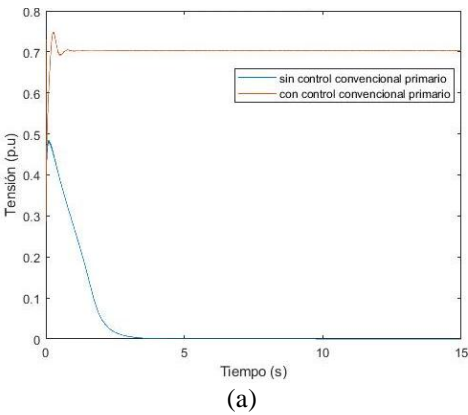
**Tabla 4.** Escenarios para la simulación

Escenario	Observaciones
1.- Microrred eléctrica sin Control Convencional Primario	Microrred eléctrica sin métodos de control de tensión o de frecuencia en ninguna de sus fuentes generadoras.
2.- Microrred eléctrica con control convencional primario.	Microrred eléctrica con sistema de excitación en la máquina sincrónica y gobernador a diesel para el control de tensión y frecuencia, respectivamente y control de ángulo de inclinación para el control de frecuencia ante variaciones de la velocidad del viento en la máquina asincrónica.
3.- Microrred eléctrica con Control Convencional Primario (propuesto).	Microrred eléctrica con sistema de excitación, gobernador a diesel en la máquina sincrónica y control ángulo de inclinación en la máquina asincrónica, para el control de tensión y frecuencia, con valores de la ganancia $K$ propuesta.
4.- Microrred eléctrica con perturbaciones.	Microrred eléctrica con control convencional primario con perturbaciones en la carga, en las líneas de distribución eléctrica y variación de la velocidad del viento.

Finalmente, se compara la respuesta de la ganancia  $K$  de los demás estudios con la propuesta para ver con qué valor se obtienen los mejores resultados de tensión y frecuencia del sistema.

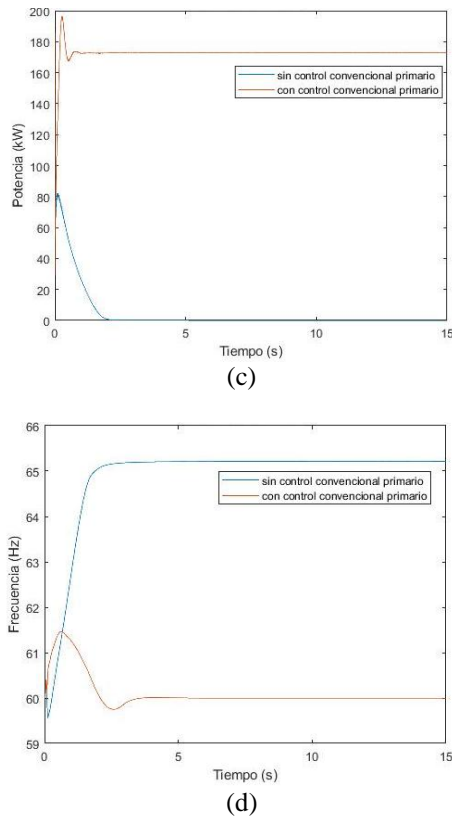
#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

En la microrred eléctrica se obtuvo una respuesta sin control convencional primario y con control convencional primario; en el primer caso los valores no se mantienen en su referencia y caen abruptamente; en el segundo caso los valores se mantienen en su referencia como se indica en las figura 12:



Elaborado por: Francisco Andrade



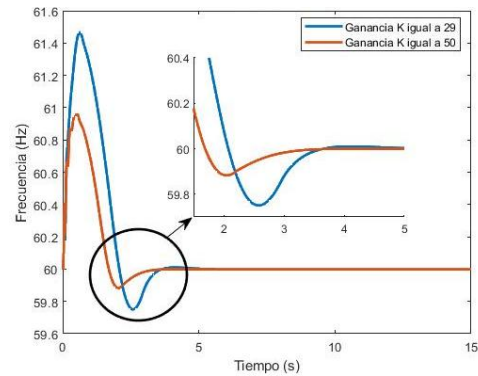


**Figura 12.** Respuesta de salida sin control convencional primario y con control convencional primario de: (a) Tensión, (b) Corriente, (c) Potencia y (d) Frecuencia. Elaborado por: Francisco Andrade

Al observar la figura 12(a) las máquinas en un estado inicial establecen un cierto valor de tensión pero al no poseer un sistema de excitación o una máquina gobernador a diesel, las tensiones no se mantienen y caen abruptamente a diferencia de tener un control de tensión en donde a la máquina logra estabilizarse luego de algunos segundos. Lo mismo sucede con la figura 12(b) al ser una variable dependiente de la otra. Si en un sistema no se tiene tensión en los terminales no existirá un flujo de corriente. En la figura 12(c) es exactamente lo mismo, la potencia depende de la tensión y la corriente; en lo que respecta a la figura 12(d) la frecuencia se mantiene por encima de los 60 Hz.

La figura 13 muestra las salidas frecuencia en la carga de 175 kW, la microrred con control convencional

primario con ganancia K igual a 29 propuesta por los autores anteriores y el aumento propuesto por el estudio hasta K igual 50 ya que valores mayores a este la frecuencia vuelve a oscilar en valores pequeños.

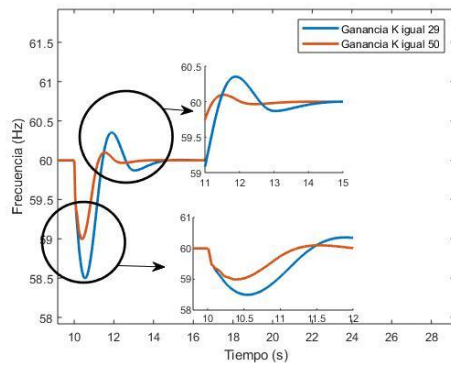


**Figura 13.** Respuesta de salida con control convencional primario y cambio en la ganancia K de Frecuencia. Elaborado por: Francisco Andrade

El cambio en el valor de la ganancia K no afecta los parámetros de tensión, corriente y potencia, solo afecta al parámetro de frecuencia, debido a que este valor de ganancia afecta los parámetros Kp y Ki del controlador PI, cuya ubicación está en la máquina gobernador a diesel y es la que regula la frecuencia, y no tiene que ver con los valores de tensión en los terminales, ni con la corriente ni la potencia.

Debido a esto, la microrred junto con su control, fue sometida a perturbaciones como, cambios en la carga, conexión y desconexión de la misma, fallos en las líneas del tendido eléctrico y variación en la velocidad del viento. Todas estas fallas fueron ocasionadas intencionalmente para observar el comportamiento de la microrred. A continuación se presenta los cambios realizados para cada falla:

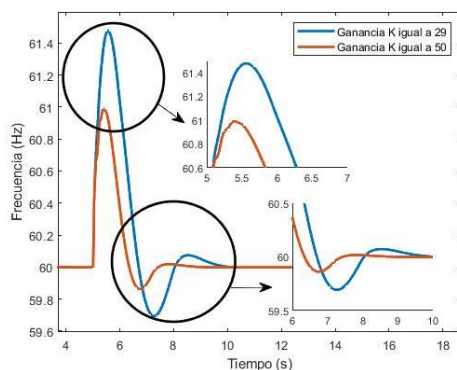
La primera perturbación es el cambio de carga de 175 kW a 350 kW produciendo una disminución en la frecuencia. como se muestra en la figura 14.



**Figura 14.** Frecuencia del sistema con ganancia  $K=29$  y  $K=50$  y aumento en la carga. Elaborado por: Francisco Andrade

En la figura 14 se puede observar cómo el aumento en la carga provoca una caída en la frecuencia. La ganancia  $K$  disminuye el tiempo de establecimiento y los sobreimpulsos.

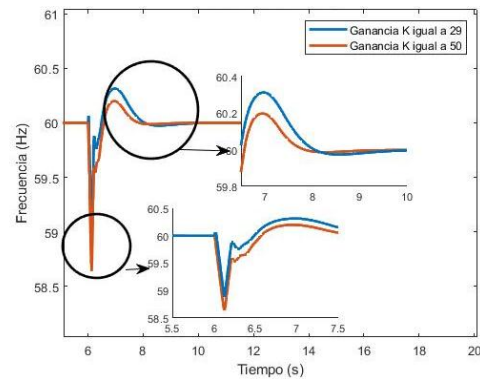
La perturbación ahora depende de la desconexión de la carga que es el cambio de 350kw a 175kw produciendo un aumento en la frecuencia como se muestra en la figura 15.



**Figura 15.** Frecuencia del sistema con ganancia  $K=29$  y  $K=50$  y disminución en la carga. Elaborado por: Francisco Andrade

En la figura 15 se puede observar cómo la disminución en la carga provoca un sobreimpulso en la frecuencia. La ganancia  $K$  disminuye el tiempo de establecimiento y los sobreimpulsos.

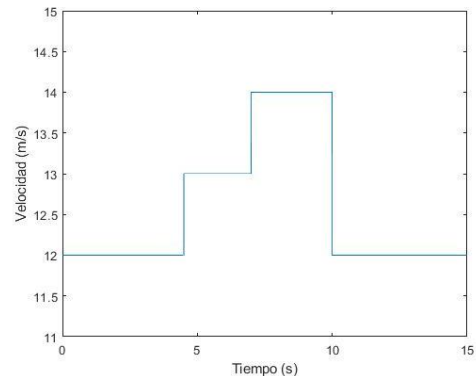
Como tercera perturbación tenemos una desconexión en las líneas de tensión trifásicas durante 0.1 segundos como se muestra en la figura 16.



**Figura 16.** Frecuencia del sistema con ganancia  $K=29$  y  $K=80$  y desconexión en las líneas de tendido eléctrico. Elaborado por: Francisco Andrade

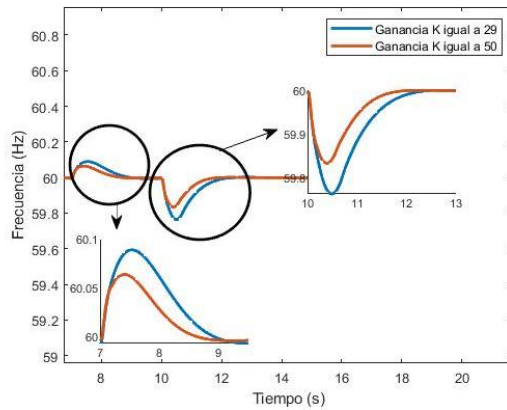
En la figura 16 se puede observar que en un instante de tiempo corta el suministro de energía provocando un hueco, pero se recupera instantáneamente, mas rápido con el valor de  $K$  propuesto el tiempo de estabilización no varía mucho.

Como última perturbación está la velocidad del viento que se representa en la figura 17.



**Figura 17.** Variación de la velocidad del viento. Elaborado por: Francisco Andrade

La velocidad inicial se fija en 12m/s por condiciones propias del aerogenerador y en el tiempo igual a 4.5 segundos aumenta 1m/s, seguidamente en el segundo 7 aumenta 1m/s más, finalmente disminuye en 2m/s en el segundo 10. En la figura 18 se muestra la respuesta de la frecuencia:



**Figura 18.** Frecuencia del sistema con variación de la velocidad del viento. Elaborado por: Francisco Andrade

Al aumentar la velocidad del viento, la frecuencia aumenta y viceversa; al disminuir la velocidad del viento la frecuencia disminuye.

Comparando los resultados de los escenarios de las perturbaciones y comparándolos en la tabla 5 se puede apreciar que al poseer una componente  $K_i$  el error en estado estacionario es cero en los dos casos, para el caso del sobreimpulso varía en cantidades muy pequeñas sin afectar el sistema manteniéndose siempre en un rango de 59 Hz a 62 Hz, para el tiempo de estabilización con una ganancia de  $K=29$ . El tiempo es mayor en comparación al tiempo cuando la ganancia es  $K=50$ . Lo mismo para el tiempo de subida es reducido en todos los casos para una ganancia  $K=50$ .

**Tabla 5.** Resultados comparativos con ganancia  $K = 29$  y  $K=50$ .

Perturbación	TIEMPO DE SUBIDA (SEGUNDOS)		SOBREIMPULSO (%)		TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN (SEGUNDOS)		ERROR EN ESTADO ESTACIONARIO (%)	
	$K=29$	$K=50$	$K=29$	$K=50$	$K=29$	$K=50$	$K=29$	$K=50$
<i>Condición inicial</i>	0.668	0.553	2.43	1.6	4.753	3.387	0	0
<i>Aumento de carga</i>	2.071	1.64	0.6	0.18	4.976	3.61	0	0
<i>Disminución de carga</i>	0.575	0.417	2.46	1.65	4.876	3.61	0	0
<i>Desconexión en las líneas de tensión</i>	1.064	1.007	0.52	0.33	3.869	3.035	0	0
<i>Aumento de la velocidad del viento</i>	0.646	0.603	0.15	0.1	1.769	1.438	0	0
<i>Disminución de la velocidad del viento</i>	2.128	1.654	0	0	2.128	1.654	0	0

Elaborada por: Francisco Andrade

La tabla 5 indica una mejora considerablemente satisfactoria al aumentar la ganancia  $K$  del sistema. Los parámetros considerados en el estudio como importantes son el tiempo de estabilización y el tiempo de subida, los cuales fueron reducidos satisfactoriamente, para la condición inicial o estado de arranque de las máquinas hay una diferencia del 18% en el tiempo de subida, 0.81% en el sobreimpulso, 28.74% en el tiempo de estabilización. Para el aumento de carga hay una diferencia del 20.81% en el tiempo de subida, 0.41% en el sobreimpulso, 27.45% en el tiempo de estabilización. Para la disminución de carga hay una diferencia del 27.48% en el tiempo de subida, 0.79% en el sobreimpulso, 25.96% en el tiempo de estabilización. Para la desconexión en las líneas de tensión hay una diferencia del 5.35% en el tiempo de subida, 0.18% en el sobreimpulso, 21.55% en el tiempo de estabilización. Para el aumento de velocidad del viento hay una diferencia del 6.65% en el tiempo de subida, 0.05% en el sobreimpulso, 17.58% en el tiempo de estabilización. Para la disminución de velocidad del viento hay una diferencia

del 22.27% en el tiempo de subida, 0% en el sobreimpulso, 22.27% en el tiempo de estabilización. Como se puede observar el aumento de la ganancia  $K$  aumenta en promedio 16% en el tiempo de subida, 0.37% en el sobreimpulso y 23.93% en el tiempo de estabilización. Considerando lo planteado anteriormente, en esta investigación lo que se busca es reducir los tiempos de subida y de estabilización del sistema ante las fallas ocasionadas.

## 6. CONCLUSIONES

Las variables de control que fueron tomadas en cuenta para la investigación fueron la tensión y la frecuencia, también llamadas variables primarias, por el motivo de ser las primeras en ser afectadas durante una perturbación, al encontrarse en el primer nivel de la pirámide de control fue necesario implementar un controlador convencional primario Proporcional-Integral.

Por medio del software Matlab-Simulink y con circuitos ya simulados y validados

se modificó e implementó una microrred eléctrica con fuentes generadoras de energía controladas.

Se diseñó un control convencional primario PI para la microrred, el cual fue específicamente aplicado para las máquinas rotatorias, en su gobernador diesel, y para el aerogenerador.

Se validó el controlador convencional primario PI mediante perturbaciones ocasionadas intencionalmente. Los criterios de estabilidad cumplieron las expectativas de la investigación al momento de modificar valores de ganancia.

Una vez definidos los valores de ganancia con la mejor respuesta la microrred reaccionó de forma satisfactoria, el tiempo de subida y el tiempo de estabilización para este estudio que fueron los más relevantes fueron reducidos, con el valor de la ganancia K igual a 50, el sobreimpulso, aunque con cambios insignificantes también se redujo y su error en estado estacionario llegó a ser cero para todos los casos.

#### REFERENCIAS

- [1] A. S. Eldessouky and H. A. Gabbar, "Micro Grid Stability Enhancement Using SVC with Fuzzy Model Reference Learning Controller Algorithm," *2015 IEEE Int. Conf. Smart Energy Grid Eng.*, pp. 1–6.
- [2] E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, and L. Orsini, "Designing microgrid energy markets A case study: The Brooklyn Microgrid," *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 870–880, 2018.
- [3] M. Khederzadeh, H. Maleki, and V. Asgharian, "Electrical Power and Energy Systems Frequency control improvement of two adjacent microgrids in autonomous mode using back to back Voltage-Sourced Converters," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 74, pp. 126–133, 2016.
- [4] S. Choudhury, A. Choudhury, D. Panda, and P. K. Rout, "Optimal control of islanded microgrid with adaptive fuzzy logic & PI controller using HBCC under various voltage & load variation," *Proc. IEEE Int. Conf. Circuit, Power Comput. Technol. ICCPCT 2016*, 2016.
- [5] A. S. Eldessouky and H. A. Gabbar, "Micro Grid stability enhancement using SVC with fuzzy model reference learning controller algorithm," *Int. Conf. Smart Energy Grid Eng. SEGE 2015*, 2015.
- [6] M. Khederzadeh, H. Maleki, and V. Asgharian, "Frequency control improvement of two adjacent microgrids in autonomous mode using back to back Voltage-Sourced Converters," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 74, pp. 126–133, 2016.
- [7] R. Pérez, E. Inga, A. Aguila, V. Carmen, L. Lima, and A. Vilorio, "Fault Diagnosis on Electrical Distribution Systems Based on Fuzzy Logic," *Lect. Notes Comput. Sci.*, vol. 10942, pp. 174–185, 2018.
- [8] R. Sebastián, "Simulation of the Transition from Wind only Mode to Wind Diesel Mode in a No-Storage Wind Diesel System," vol. 7, no. 5, 2009.
- [9] R. Sebastián and R. Pe, "Simulation of an isolated Wind Diesel System with battery energy

- storage,” vol. 81, pp. 677–686, 2011.
- [10] O. Krishan, “Frequency Regulation in a Standalone Wind-Diesel Hybrid Power System using Pitch-Angle Controller,” *2016 3rd Int. Conf. Comput. Sustain. Glob. Dev.*, pp. 1148–1152, 2016.
- [11] E. Riva Sanseverino *et al.*, “Improved primary regulation for minimum energy losses in islanded microgrids,” *2017 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT-Europe 2017 - Proc.*, vol. 2018–Janua, pp. 1–6, 2018.
- [12] I. T. Force *et al.*, “Trends in Microgrid Control,” vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, 2014.
- [13] P. Kofinas, A. I. Dounis, and G. A. Vouros, “Fuzzy Q-Learning for multi-agent decentralized energy management in microgrids,” *Appl. Energy*, vol. 219, no. December 2017, pp. 53–67, 2018.
- [14] J. Li, R. Xiong, Q. Yang, F. Liang, M. Zhang, and W. Yuan, “Design/test of a hybrid energy storage system for primary frequency control using a dynamic droop method in an isolated microgrid power system,” *Appl. Energy*, vol. 201, pp. 257–269, 2017.
- [15] A. Grama, D. Petreus, R. Etz, and T. Patarau, “Fuel Consumption Reduction of a Diesel – Electric Power Generator,” *2015 38th Int. Spring Semin. Electron. Technol.*, no. 2, pp. 381–384, 2015.
- [16] I. K. Fellow, P. Brunelle, and G. Sybille, “Synchronous Machine Stability Model , an Update to IEEE Std 1110-2002 Data Translation Technique,” *2018 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–5, 2018.
- [17] P. Andrea and C. Toro, “Determinación de rangos de operación de generador de inducción para aplicación en aerogeneradores,” 2010.
- [18] E. Kabalci, A. Boyar, and Y. Kabalci, “Design and analysis of a micro inverter for PV plants,” *Proc. 9th Int. Conf. Electron. Comput. Artif. Intell. ECAI 2017*, vol. 2017–Janua, no. c, pp. 1–6, 2017.
- [19] L. Sherpa, U. Vinatha Urundady, and B. Rai, “Hybrid PV/wind energy system with a centralized DC bus architecture and power regulation,” *12th IEEE Int. Conf. Electron. Energy, Environ. Commun. Comput. Control (E3-C3), INDICON 2015*, pp. 2–7, 2016.
- [20] S. N. M, O. Tremblay, M. Ieee, L. Dessaint, and S. M. Ieee, “A Generic Fuel Cell Model for the Simulation of Fuel Cell Vehicles,” *2009 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1722–1729, 2009.
- [21] A. La Bella, S. R. Cominesi, C. Sandroni, and R. Scattolini, “Hierarchical Predictive Control of Microgrids in Islanded Operation,” pp. 1–11, 2016.
- [22] J. Chen, M. N. Omidvar, M. Azad, and X. Yao, “Knowledge-based Particle Swarm Optimization for PID Controller Tuning,” *2017 IEEE Congr. Evol. Comput.*, pp. 1819–1826, 2017.
- [23] R. Perez, “Aplicación de lógica borrosa para la identificación de fallas en sistemas eléctricos de distribución,” no. September, 2016.

- [24] E. Development, P. G. Committee, and P. E. Society, *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*. 1992.
- [25] E. Society, *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, vol. 2016. 2016.
- [26] S. Benhamed, H. Ibrahim, and K. Belmokhtar, "Dynamic Modeling of Diesel Generator Based on Electrical and Mechanical Aspects," 2016.
- [27] M. Fdaili, A. Essadki, and M. Nadour, "Comparative Study of MPPT and Pitch Angle Control Strategies for a Wind Energy Conversion System," *2017 Int. Renew. Sustain. Energy Conf.*, pp. 1–6.
- [28] J. Zhang, M. Cheng, Z. Chen, and X. Fu, "Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines," no. April, pp. 2691–2696, 2008.
- [29] R. Pérez and C. Vásquez, "Fault Location in Distribution Systems with Distributed Generation Using Support Vector Machines and Smart Meters," pp. 0–5, 2016.
- [30] Z. Moravej, A. A. Abdoos, and M. Pazoki, "Detection and classification of power quality disturbances using wavelet transform and support vector machines," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 38, no. 2, pp. 182–196, 2010.
- [31] R. R. Nasyrov, R. I. Aljendy, and T. Kherbek, "Study and analysis of power quality situation in electrical power network. Case study: Lattakia-Syria," *Proc. 2018 IEEE Conf. Russ. Young Res. Electr. Electron. Eng. ElConRus 2018*, vol. 2018–Janua, pp. 712–718, 2018.
- [32] R. Perez, C. Vásquez, and A. Vilorio, "An intelligent strategy for faults location in distribution networks with distributed generation," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 36, no. 2, pp. 1627–1637, 2019.
- [33] R. Perez, "Técnicas para la localización de fallas en sistemas aéreos radiales de distribución de energía eléctrica," *REDIP. UNEXPO. VRB Venez.*, vol. 3, pp. 474–483, 2013.